

Kalibrasi Media Kalibrasi untuk Termometer *Infrared Direct Reading* yang Bekerja pada Panjang Gelombang (8-14) μm

Calibration of Calibration Media for Direct Reading Infrared Thermometers of Working at Wavelength Range (8-14) μm

Hidayat Wiriadinata¹, Asep Insani²

¹ Pusat Riset dan Pengembangan SDM – BSN

² Balai Pengembangan Instrumentasi - LIPI

hidayatwr@bsn.go.id

ABSTRAK

Sistem kalibrasi termometer infrared *direct reading* umumnya terdiri dari benda hitam (*blackbody*) sebagai media kalibrasi dan termometer kontak (termokopel atau Pt-100) sebagai termometer standar. Namun, penggunaan termometer kontak tersebut dapat menyebabkan terjadinya kesalahan pengukuran karena adanya gradien suhu pada media kalibrasi. Pada penelitian ini pengaruh gradien suhu telah ditiadakan dengan menghilangkan penggunaan termometer kontak sebagai termometer standar. Sebagai gantinya, benda hitam telah dikalibrasi sehingga radiasi termal yang dipancarkannya akan setara dengan suhu ekspektasi (t_{exp}) yang merupakan suhu acuan pada kalibrasi termometer infrared *direct reading*. Benda hitam yang telah dikalibrasi terhadap suatu termometer radiasi standar untuk tanggapan spektral 8-14 μm dan emisivitas 0,95. Representasi dari sumber radiasi termal acuan tersebut berupa suatu persamaan yang melibatkan beberapa faktor, di antaranya suhu termometer radiasi standar. Penggunaan persamaan kalibrasi pada benda hitam untuk rentang 50 °C – 500 °C memberikan ketidakpastian antara 2,7 °C dan 5,7 °C.

Kata Kunci: termometer, benda-hitam, kalibrasi, radiasi

ABSTRACT

Infrared direct reading thermometer calibration systems generally consist of a black body as the calibration medium and a contact thermometer (thermocouple or Pt-100) as the standard thermometer. However, this contact thermometers application can cause measurement errors due to the temperature gradient on the calibration media. In this study, the effect of the temperature gradient has been eliminated by eliminating the use of the contact thermometers as the standard thermometers. Instead the black body has been calibrated, so that the thermal radiation it emits will be equivalent to the expectation temperature (t_{exp}) which is the reference temperature on the calibration of the infrared direct reading thermometer. The

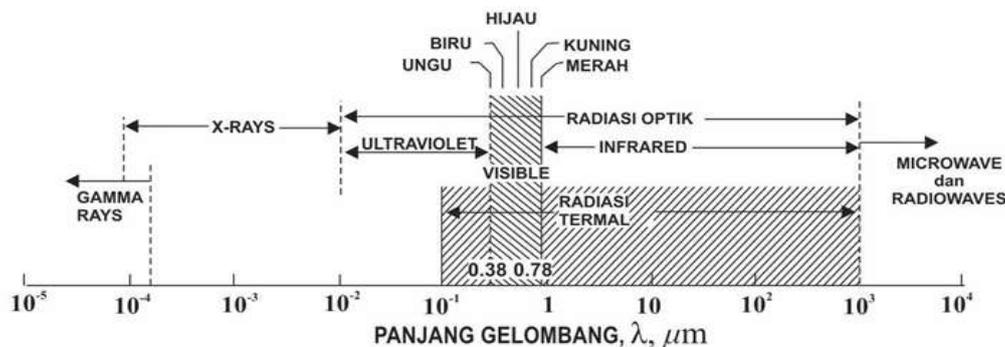
black body has been calibrated against a standard radiation thermometer for spectral responses (8-14) μm and emissivity 0.95. The representation of the reference thermal radiation source is in the form of an equation that involves several factors, including the temperature of a standard radiation thermometer. The application of a calibration equation on the black bodies for the range 50 $^{\circ}\text{C}$ - 500 $^{\circ}\text{C}$ gives an uncertainty between 2.7 $^{\circ}\text{C}$ and 5.7 $^{\circ}\text{C}$.

Keywords: blackbody, calibration, radiation thermometers, emissivity, spectral responses.

1. Pendahuluan

Termometer radiasi (*radiation thermometer*) adalah termometer jenis non-kontak yang banyak digunakan di lingkungan industri. Termometer radiasi digunakan untuk mengukur radiasi termal yang dipancarkan oleh benda ukur. Radiasi termal tersebut berbentuk gelombang

elektromagnetik yang kemudian oleh sistem elektronik termometer radiasi diubah menjadi besaran suhu. Radiasi termal merupakan semua gelombang yang berada di antara panjang gelombang 0.1 μm dan 1000 μm , seperti diperlihatkan pada Gambar 1. (DeWitt, Incropera, 1988)



Gambar 1. Radiasi termal sebagai bagian dari gelombang elektromagnetik.

Komponen utama termometer radiasi adalah kombinasi detektor dan filter yang peka terhadap panjang gelombang radiasi termal tertentu, biasanya panjang gelombang yang ketika merambat di udara nyaris tak ada hambatan, misalnya radiasi termal pada panjang gelombang 0,65 μm ,

0,9 μm dan (8-14) μm . Jenis kombinasi detektor dan filter merupakan tanggapan spektral (*spectral response*) dari termometer radiasi. Saat ini penggunaan termometer radiasi cenderung meningkat, khususnya jenis termometer radiasi suhu rendah yang memiliki tanggapan spektral

pada daerah *infrared* sehingga di kalangan pengguna termometer ini lebih dikenal sebagai termometer *infrared*. Karena termometer *infrared* dilengkapi dengan penayang suhu hasil pengukuran sehingga termometer *infrared* sering pula disebut termometer *infrared* jenis *direct reading*. (Saunders, 2008). Disebut demikian karena ada termometer *infrared* jenis lain yang outputnya masih berupa arus atau tegangan listrik dc (*direct current*) dan harus dikonversi dahulu secara manual untuk memperoleh nilai suhu hasil pengukurannya. Untuk memelihara ketertelusuran, termometer *infrared* dikalibrasi secara berkala. Sistem kalibrasinya terdiri atas termometer standar dan benda-hitam sebagai media kalibrasinya. (Nicholas, White, 2001). Untuk selanjutnya termometer *infrared direct reading* disebut termometer infra merah. Sistem kalibrasi termometer *infrared* jenis *direct reading*, akan Untuk menentukan nilai t_{exp} dapat digunakan sistem kalibrasi yang tersusun dari benda-hitam sebagai media kalibrasi dan termometer kontak sebagai termometer standar, misalnya termokopel atau termometer tahanan platina (*platinum resistance thermometer*). Secara skematik sistem kalibrasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2. Posisi termometer standar tidak sama dengan posisi titik ukur termometer

menghasilkan suatu nilai suhu acuan yang disebut suhu ekspektasi (*expected temperature*, t_{exp}). Suhu ekspektasi adalah suhu yang diharapkan tampil pada penayang termometer *infrared* yang diperoleh dengan menghitung beberapa parameter yang berasal dari suhu benda-hitam, emisivitas benda-hitam, emisivitas dan suhu detektor termometer *infrared* yang dikalibrasi serta suhu lingkungan. (Wiriadinata, 2015). Hasil kalibrasi termometer *infrared* berupa suatu nilai koreksi, yaitu nilai ekspektasi dikurangi oleh penunjukan termometer yang dikalibrasi yang dinyatakan dengan persamaan:

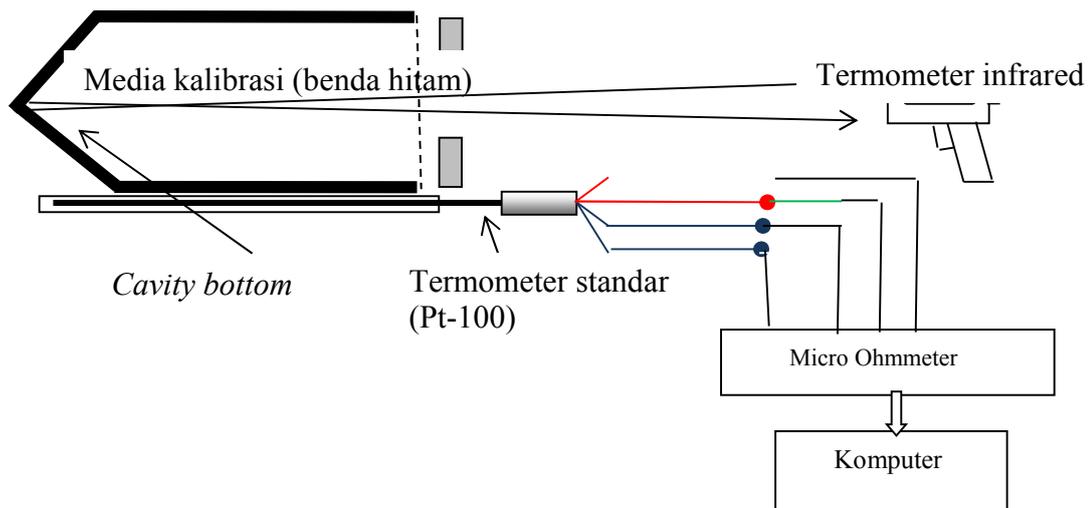
$$\text{koreksi} = t_{exp} - t_{uut}. \quad [1]$$

dengan :

t_{exp} = nilai suhu ekspektasi sebagai nilai acuan, °C

t_{uut} = suhu yang ditunjukkan oleh termometer *infrared* yang dikalibrasi, °C

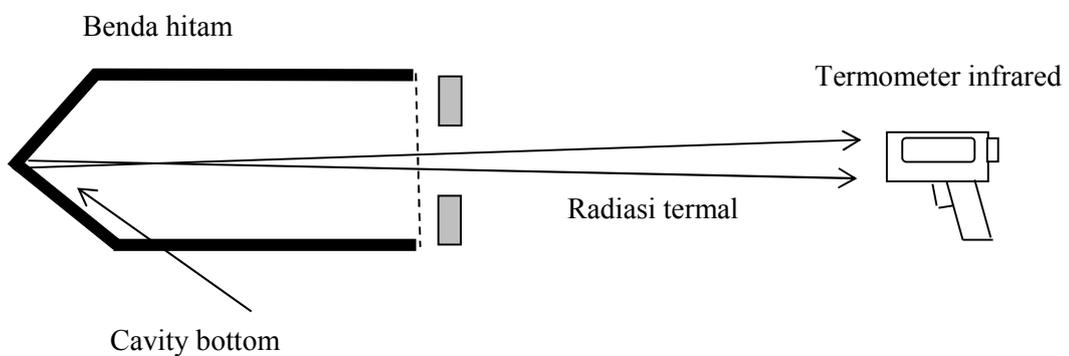
infrared yang dikalibrasi, oleh karena itu sistem ini rawan dengan kesalahan yang disebabkan oleh faktor *gradien suhu* pada media kalibrasi. Hal ini berkontribusi pada besarnya nilai ketidakpastian kalibrasi.



Gambar 2. Sistem kalibrasi dengan termometer kontak sebagai termometer standar.

Dengan menghilangkan penggunaan termometer kontak, pengaruh gradien suhu dapat dihilangkan sehingga sistem kalibrasi menjadi lebih sederhana, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Agar

sistem ini masih dapat digunakan untuk kalibrasi termometer *infrared direct reading*, suhu dari radiasi termal yang dipancarkan oleh benda hitam harus dikalibrasi untuk memperoleh t_{exp} .

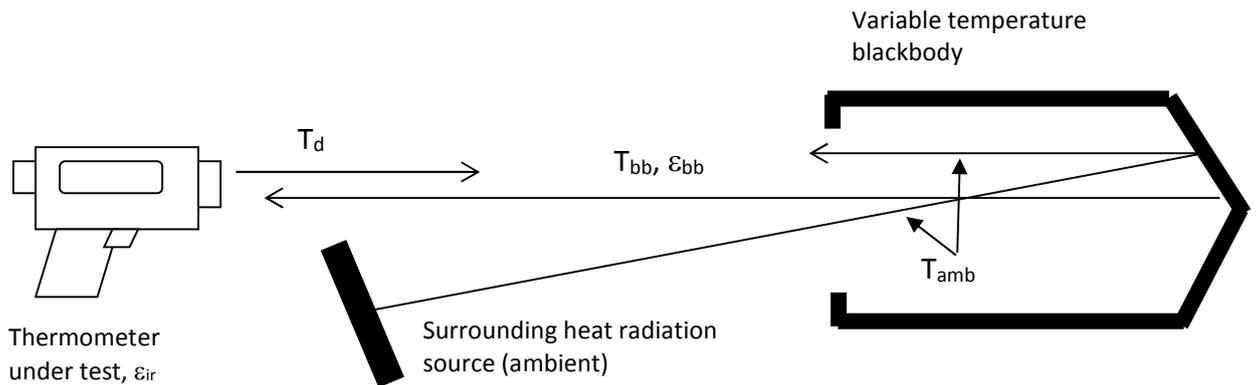


Gambar 3. Sistem kalibrasi termometer infrared tanpa termometer kontak sebagai standar

Pada tulisan ini, akan dibahas tentang kalibrasi suhu radiasi termal benda-hitam, selanjutnya benda hitam dapat digunakan

sebagai sumber radiasi panas standar pada kalibrasi termometer *infrared direct reading*.

2. Persamaan pengukuran termometer radiasi *direct reading*



Gambar 4. Radiasi termal netto yang diterima termometer infrared

Radiasi termal yang diterima oleh termometer infrared berasal dari:

- benda hitam : ϵ_{bb} , T_{bb} (ϵ_{bb} = emisivitas benda hitam, T_{bb} = suhu benda hitam);
- suhu sekeliling, T_{amb} , yang dipantulkan benda hitam;
- suhu detektor termometer infrared, T_d , yang keluar dari termometer infrared Suhu ekspektasi yang ditampilkan oleh termometer *infrared* ketika ditunjukkan pada benda hitam, diberikan oleh Persamaan [2], (wiriadinata, 2015) :

$$S_{ir}(T_{exp}) = \frac{\epsilon_{bb} S_{ir}(T_{bb}) + (1 - \epsilon_{bb}) S_{ir}(T_{amb}) - (1 - \epsilon_{ir}) S_{ir}(T_d)}{\epsilon_{ir}}$$

[2]

dengan :

$$S_{ir}(T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{ir} T + B_{ir}}\right)} = \text{luaran}$$

termometer *infrared*, A

$$A_{ir} = \lambda_{ir} \left(1 - 6 \frac{\sigma_{ir}^2}{\lambda_{ir}^2} \right) = \text{parameter termometer}$$

infrared sebagai fungsi tanggapan spektral termometer *infrared*, μm

$$B_{ir} = \frac{c_2 \sigma^2}{2 \lambda_{ir}^2} = \text{parameter termometer}$$

infrared sebagai fungsi tanggapan spektral termometer *infrared*, μm

λ_{ir} = tanggapan spektral relatif rata-rata termometer *infrared*, μm

σ_{ir} = standar deviasi tanggapan spektral relatif termometer *infrared*, μm

$\Delta\lambda_{ir}$ = *band width* dari tanggapan spektral relatif termometer *infrared*, μm .

T_{bb} = suhu benda-hitam, K

T_{amb} = suhu lingkungan, K

ϵ_{bb} = emisivitas benda-hitam

ϵ_{ir} = emisivitas termometer *infrared*

Bila suatu termometer radiasi standar menggantikan posisi termometer maka berlaku

$$S_{ref}(T_{ref}) = \frac{\epsilon_{bb} S_{ref}(T_{bb}) + (1 - \epsilon_{bb}) S_{ref}(T_{amb}) - (1 - \epsilon_{ref}) S_{ref}(T_d)}{\epsilon_{ref}}$$

dengan:

$$S_{ref}(T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{ref}T + B_{ref}}\right)} = \text{output}$$

termometer standar, A

$$A_{ref} = \lambda_{ref} \left(1 - 6 \frac{\sigma_{ref}^2}{\lambda_{ref}^2}\right) = \text{parameter}$$

termometer standar sebagai fungsi tanggapan spektral termometer standar, μm

$$B_{ref} = \frac{c_2 \sigma_{ref}^2}{2 \lambda_{ref}^2} = \text{parameter termometer}$$

infrared sebagai fungsi tanggapan spektral termometer *infrared*, μm

λ_{ref} = tanggapan spektral relatif rata-rata

termometer standar, μm

σ_{ref} = standar deviasi tanggapan spektral

relatif termometer standar, μm

Δ band width dari tanggapan spektral

relatif termometer standar, μm .

T_{bb} = suhu benda-hitam, K

T_{amb} = suhu lingkungan, K

ϵ_{bb} = emisivitas benda-hitam

ϵ_{ref} = emisivitas termometer standar

3. Metode Kalibrasi Benda hitam.

Untuk menurunkan persamaan kalibrasi benda-hitam digunakan 2 persamaan, yaitu persamaan input radiasi termal termometer *infrared* dan persamaan

input radiasi termal termometer standar, dalam hal ini termometer radiasi standar memiliki tanggapan spektral yang sama dengan termometer *infrared*.

Oleh karena termometer *infrared* dan termometer standar memiliki tanggapan spektral yang sama, misalnya (8-14) μm , sehingga $A_{ir} = A_{ref} = A$ dan $B_{ir} = B_{ref} = B$ sehingga

$$S_{ir}(T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{ir}T + B_{ir}}\right)} \rightarrow S(T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{AT + B}\right)}$$

$$S_{ref}(T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{ref}T + B_{ref}}\right)} \rightarrow S(T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{AT + B}\right)}$$

maka persamaan (2) menjadi:

$$S(T_{exp}) = \frac{\epsilon_{bb} S(T_{bb}) + (1 - \epsilon_{bb}) S(T_{amb}) - (1 - \epsilon_{ir}) S(T_d)}{\epsilon_{ir}} \quad [4]$$

dan Persamaan [3] menjadi:

$$S(T_{ref}) = \frac{\epsilon_{bb} S(T_{bb}) + (1 - \epsilon_{bb}) S(T_{amb}) - (1 - \epsilon_{ref}) S(T_d)}{\epsilon_{ref}} \quad [5]$$

Bila $\epsilon_{ref} = 1$ maka persamaan [5] menjadi:

$$S(T_{ref}) = \epsilon_{bb} S(T_{bb}) + (1 - \epsilon_{bb}) S(T_{amb}) \quad [6]$$

bila persamaan [6] disubstitusikan ke persamaan [4], maka diperoleh persamaan kalibrasi benda hitam seperti diperlihatkan pada persamaan [7]

$$S(T_{exp}) = S(T_{ref}) + \frac{(1 - \epsilon_{ir})}{\epsilon_{ir}} [S(T_{ref}) - S(T_d)]$$

Dalam persamaan [7], T_{exp} adalah suhu radiasi termal dari benda hitam, yang besarnya tidak tergantung pada emissivitas benda hitam dan suhu sekitar, namun

tergantung pada suhu yang terbaca oleh termometer radiasi standar, T_{ref} , suhu detektor T_d dan pengaturan emisivitas termometer *infrared* yang dikalibrasi ϵ_{ir} . Besarnya suhu detektor T_d pada dasarnya hampir sama dengan suhu lingkungan sehingga sering diasumsikan $T_d = T_{amb}$.

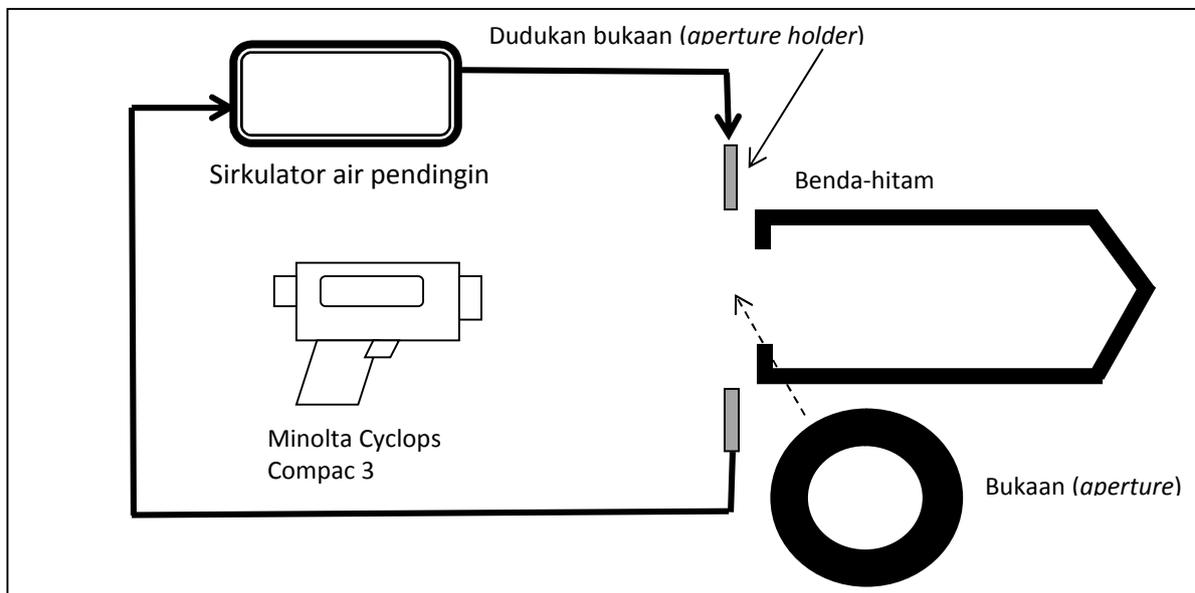
Dengan menggunakan persamaan:

$$t_{exp} = \frac{c_2}{A \ln\left(\frac{1}{S(T_{exp})+1}\right)} - \frac{B}{A} - 273.15$$

dan nilai $S(T_{exp})$ diperoleh dari persamaan [7] maka dapat diperoleh nilai t_{exp} akan digunakan sebagai suhu acuan pada kalibrasi termometer *infrared direct reading*.

4. Implementasi praktis

Sebagai implementasi dari Persamaan [7] telah dibuat sistem kalibrasi baru seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5. Agar benda hitam hasil kalibrasi ini dapat digunakan untuk mengkalibrasi termometer *infrared direct reading* yang umumnya memiliki tanggapan spektral (8-14) μm , termometer radiasi standar yang digunakan harus memiliki tanggapan spektral (8-14) μm pula. (Saunders, 2009). Termometer radiasi standar yang telah digunakan pada implementasi ini adalah termometer radiasi *Minolta Cyclops Compac 3* dengan spesifikasi teknis pada Tabel 1.



Gambar 5. Skema sistem kalibrasi benda-hitam.

Tabel 1. Spesifikasi teknis Minolta Cyclops Compac 3.
(Land Infrared Ltd, Dronfield, England, 1992)

Rentang suhu	50 °C – 500 °C
Target diameter	35 mm pada jarak 2 m
Tanggapan spektral	(8 – 14) μm
Emisivitas	0,01 – 1,00, step 0,01
Ketidaktepastian (t.k. 95%, k = 2)	(2.4 ~ 5,6) °C untuk 50 °C ~ 500°C



Gambar 6. Termometer radiasi standar
Minolta Cyclops Compac 3

Sistem memiliki bukaan (*aperture*) dari pelat logam yang ditempatkan pada suatuudukan (*aperture holder*) di depan benda-hitam. Suhu bukaan dipertahankan tetap sama dengan suhu ruang, yaitu dengan cara mengalirkan air yang suhunya dikontrol oleh suatu alat pendingin. Bukaan berguna untuk menghindari adanya ketidaktepastian karena berbedanya diameter benda-hitam yang dikalibrasi dengan diameter benda-hitam yang digunakan pada saat *Minolta Cyclops Compac 3* dikalibrasi.

Untuk mengantisipasi beragamnya perbedaan diameter maka telah disiapkan beberapa pelat logam yang masing-masing memiliki bukaan ditengahnya dengan diameter yang berbeda-beda.

T_{exp} akan menjadi suhu acuan pada saat benda-hitam tersebut digunakan sebagai sumber radiasi panas dalam kalibrasi termometer *infrared direct reading*. Namun, alam menurunkan persamaan kalibrasi ini, tanggapan spektral termometer radiasi standar dan termometer radiasi yang nantinya akan dikalibrasi oleh benda-hitam (UUT) adalah sama. Oleh karena itu, persamaan kalibrasi ini hanya berlaku untuk termometer radiasi yang memiliki tanggapan spektral yang sama dengan termometer radiasi standar. Sebagai contoh, jika benda-hitam dikalibrasi terhadap termometer radiasi dengan tanggapan spektral (8-14) μm , maka benda-hitam tersebut hanya bisa digunakan untuk kalibrasi termometer *infrared* dengan tanggapan (8-14) μm .

Berdasarkan pada Persamaan [7] jika dianggap

$$\frac{(1 - \epsilon_{ir})}{\epsilon_{ir}} [S(T_{ref}) - S(T_d)] \ll S(T_{ref}) \quad \text{maka}$$

$S(T_{exp}) \approx S(T_{ref})$ sehingga $u_{T_{exp}} \approx u_{T_{ref}}$. (Saunders, 2009) Adapun ketidakpastian standar total dari kalibrasi terdiri dari ketidakpastian karena pengukuran berulang, resolusi penayang benda-hitam, stabilitas benda-hitam dan ketidakpastian SSE dari termometer standar, atau:

$$u_{total} = \sqrt{u_{std}^2 + u_{repeat-texp}^2 + u_{stability-bb}^2 + u_{sse-std}^2 + u_{res-bb}^2}$$

Sebagai contoh penggunaan telah dikalibrasi sebuah benda-hitam berbentuk *flat-plate calibrator* atau *infrared calibrator* yang dipersiapkan untuk menjadi sumber radiasi standar pada kalibrasi termometer *infrared direct reading* yang memiliki emisivitas 0,95 dan tanggapan spektral (8 – 14) μm .

Infrared Calibrator yang dikalibrasi diperlihatkan pada Gambar 7 dan pada Tabel 2 ditunjukkan spesifikasi teknisnya



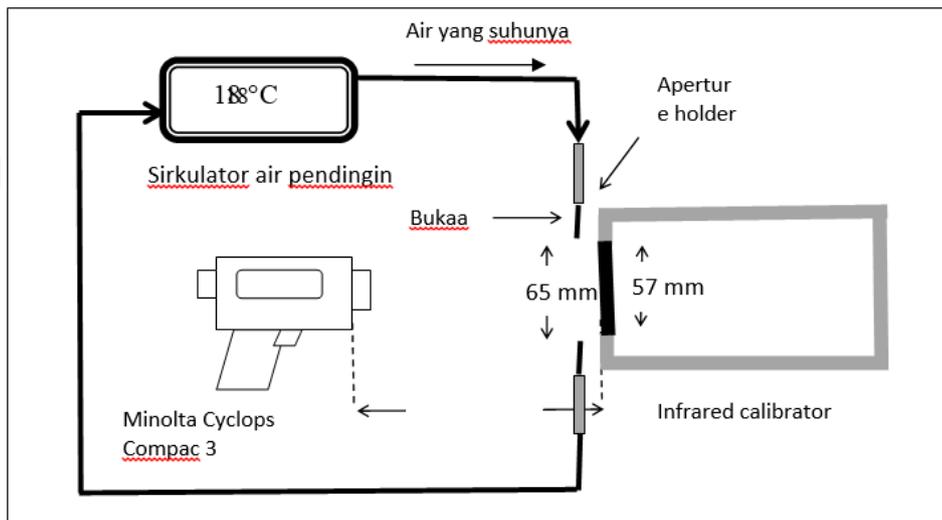
Gambar 7. Infrared Calibrator yang (Hart Scientific, 2005)

Tabel 2. Spesifikasi teknis Infrared Calibrator

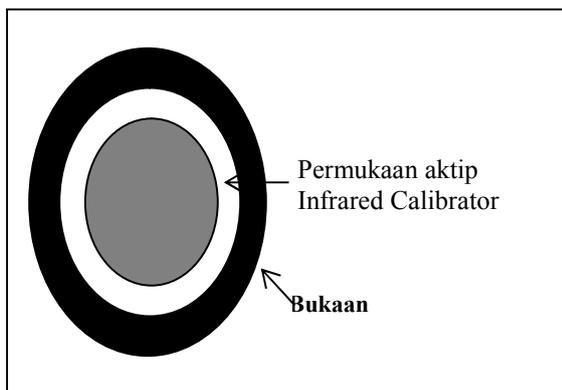
Rentang suhu	50 °C – 500 °C
Target diameter	57 mm
Tanggapan spektral	(8 – 14) μm
Emisivitas	0,95

Infrared Calibrator telah dikalibrasi pada rentang suhu 50 °C – 500 °C. Besarnya suhu ruang rata-rata pada saat dilakukan kalibrasi adalah 23 °C dengan fluktuasi disekitar ± 1 °C. Pada kalibrasi ini digunakan bukaan dengan diameter 65 mm sehingga seluruh permukaan aktif *infrared Calibrator* dapat terlingkupi, seperti diperlihatkan pada Gambar 9.

Pada saat dinyalakan, *Infrared Calibrator* akan memancarkan radiasi termal yang sebagian pancarannya akan memanaskan bukaan. Agar bukaan tidak menjadi sumber radiasi termal tambahan, suhu bukaan dipertahankan sama dengan suhu ruang. Caranya dengan mengalirkan air pendingin ke dudukan bukaan. Untuk rentang kalibrasi 50 °C ~ 500 °C air pendingin disetel pada nilai 18 °C.



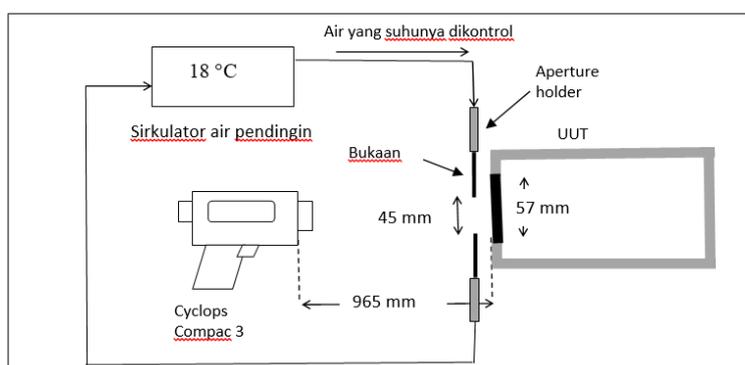
Gambar 8. Kalibrasi Infrared Calibrator



Gambar 9. Posisi bukaan terhadap Infrared Calibrator

Termometer standar dikalibrasi pada jarak 965 mm dengan diameter sumber radiasi panas 45 mm, sedangkan pada kalibrasi mengukur pada diameter 65 mm

sehingga akan terjadi kesalahan pengukuran yang disebut SSE (*size of source effect*). (Nicholas, J. V., White, D. R., 2001) Untuk mengetahui kesalahan tersebut, pada *set-point* 500 °C bukaan 65 mm diganti dengan bukaan lain yang berdiameter 45 mm. Perbedaan penunjukan termometer standar pada diameter 65 mm dan 45 mm merupakan nilai kesalahan SSE yang terjadi. Hasil kalibrasi berupa suhu radiansi t_{exp} yang dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 10. Set-up pengukuran SSE.

Tabel 3. Hasil kalibrasi Infrared Calibrator untuk $\epsilon_{ir} = 0,95, t_d = 22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Set-point, $^\circ\text{C}$	$t_{\text{std-kor}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{exp}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$U_{\text{texp}}, \text{ }^\circ\text{C}$ (t.k. 95%, k = 1,96)
50	47.3	48.5	2.7
100	94.4	97.4	2.8
150	142.3	147.0	2.9
200	189.9	196.1	3.2
250	238.3	246.1	3.4
300	286.4	295.9	3.8
350	333.3	344.5	4.2
400	381.0	394.0	4.6
450	428.7	443.4	5.2
500	476.2	492.8	5.7

5. KESIMPULAN

Besarnya emisivitas benda-hitam ϵ_{bb} yang muncul pada kalibrasi termometer radiasi merupakan fungsi dari software komersial untuk menghitungnya. Namun lebih menguntungkan jika pengaruh emisivitas ϵ_{bb} tersebut dapat dihilangkan. Hasil penurunan persamaan kalibrasi benda-hitam memperlihatkan bahwa persamaan kalibrasi tersebut tidak mengandung emisivitas benda-hitam. Oleh karena itu, ketika benda-hitam tersebut digunakan sebagai standar pada kalibrasi termometer *infrared direct reading* maka kesalahan karena faktor emisivitas tidak muncul pada hasil kalibrasinya. Namun, akibat penurunan ini cakupan layanan sistem ini terbatas hanya untuk termometer *infrared* yang memiliki tanggapan spektral yang sama dengan termometer standar. Selain itu, suhu ruangan tempat benda-

hitam digunakan harus sama besarnya dengan suhu pada saat benda-hitam tersebut dikalibrasi. Akan tetapi, hal ini bukanlah sesuatu yang menyulitkan, mengingat laboratorium kalibrasi pada umumnya menggunakan ruangan dengan suhu yang hampir sama yang berkisar antara $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $23 \text{ }^\circ\text{C}$.

Benda-hitam hasil kalibrasi ini dapat memberikan kemudahan dalam melakukan kalibrasi termometer *infrared*. Kemudahan tersebut, di antaranya sederhananya proses kalibrasi dan analisa ketidakpastiannya yang cukup dengan menggunakan tabel kalibrasi dari benda-hitam.

Daftar Pustaka

- DeWitt, D. P., & Nutter, G. D. (Eds.). (1988). *Theory and practice of radiation thermometry*. John Wiley & Sons
- Saunders, P. (2008). Calibration and use of low-temperature direct-reading radiation thermometers. *Measurement Science and Technology*, 20(2), 025104.
- Saunders, P. (2009). MSL Technical Guide 22. *Measurement Standards Laboratory of New Zealand*.
- Nicholas, J. V., White, D. R., & Temperatures, T. (2001). An

introduction to temperature measurement and calibration.

Wiriadinata, H., (2009). Sistem Kalibrasi Termometer Infrared untuk rentang 50 °C – 500 °C, *Instrumentasi Volume 33 Nomor 1 Januari – Juni 2009*, 19 – 25

Wiriadinata, H., (2015). Termometer Inframerah, Teori dan Kalibrasi. Jakarta

Land Infrared Ltd, Cyclops Compac 3 Operating Instruction, Dronfield, England, 1992

Hart Scientific, Fluke 9132 Portable Ir Calibrator User Guide, UTAH USA, 2005